

Ensaio de infiltração em modelos experimentais de coberturas secas utilizando cinzas de carvão mineral da Termelétrica do Pecém

Infiltration tests in dry covers experimental models using coal ashes from Pecém thermal power plant

Henrique Petisco de Souza¹, Anderson Borghetti Soares¹,
Deyvid de Souza Elias¹

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA - Campus do Pici UFC bloco 713, 60455-900, Fortaleza, CE, Brasil.

e-mail: henrique.petisco@gmail.com, borghetti@ufc.br, deyvidselias@gmail.com

RESUMO

O elevado volume de cinzas de carvão mineral acumulado nas bacias de armazenamento da Usina Termoelétrica Energia Pecém resultou em uma demanda por pesquisas que propusessem diferentes formas de utilização desse resíduo, de modo a dar um destino final para este material. O uso das cinzas na forma de coberturas secas de depósitos de resíduos se mostrou uma alternativa viável, devido à existência de estudos relacionados ao tema e à possibilidade de absorção de quantia significativa do volume de resíduos produzido. O estudo apresentado corresponde à segunda etapa de uma pesquisa que verificou a viabilidade da aplicação de cinzas de carvão em sistemas de cobertura de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Com base nos resultados de uma modelagem numérica preliminar, foram executadas três colunas de solo, que representaram três modelos de cobertura: Coluna A – Uma camada superior de solo natural (30 cm) e uma camada de material impermeabilizante com a mistura de solo e cinzas MS70C30 (30 cm, com 70% de solo e 30% de cinzas); Coluna B - Uma camada de solo natural (30 cm) e uma camada de material impermeabilizante com cinza composta (30 cm); e Coluna C – Camada única de solo natural (30 cm), representando a cobertura encontrada no Aterro Sanitário do Município de Caucaia. A Coluna A foi instrumentada com três sensores de umidade. Foram realizados dois ensaios de infiltração em cada coluna, avaliando-se os volumes percolados em cada sistema e os perfis de saturação da coluna instrumentada (Coluna A). Ao se avaliar volume percolado em cada ensaio, verificou-se que a mistura MS70C30 (Coluna A) mostrou o melhor desempenho, resultando em um volume percolado muito inferior em relação aos outros dois modelos. O material também manteve as condições de saturação elevadas, acima de 90% ao longo de quase todos os ensaios, condição necessária para reduzir a fuga de biogás do interior do sistema.

Palavras-chave: Cinzas de carvão mineral, Coberturas secas, Fluxo não-saturado, Colunas de solo.

ABSTRACT

The significant amount of coal ashes stored in Energia Pecém Thermoelectric Plant adjacent yards required researches that propose ways of applying this waste, allowing their correct final disposal. Application of this material in dry covers systems proved to be a viable alternative, due the former experience in other works and the possibility of absorbing a large amount of the ashes produced. This work corresponds to second part of a research that studied the application of coal ashes in engineered sanitary landfills dry cover systems. Considering data of a preliminar numerical modelling analysis, three soil columns was builded, which represented three different dry cover systems: Column A – A natural soil layer (30 cm) and a waterproof layer composed of the soil and ashes mixture M70C30 below (30 cm, composed by 70% soil and 30% ashes); Column B – A natural soil layer (30 cm) and a waterproof layer composed of ashes (30 cm) and Column C – A single layer composed of natural soil (30 cm) reproducing the dry cover adopted in Caucaia Municipal Sanitary Landfill. The Column A was instrumented with three moisture sensors. For each column were exe-

cuted two infiltration tests, measuring the percolated water volume. Furthermore, the saturation profile of the instrumented column (Column A) was obtained in the two tests. The resulting data of the experimental model demonstrated that the system with the MS70C30 mixture in the waterproof layer presented the best performance when analysing the reduction of water flux. The percolated water volume measured in this case was much lower than that obtained for the other two columns. The same material managed high levels of saturation, over 90% during almost the entire duration of tests, necessary condition to reduce biogas diffusivity in the system.

Keywords: Coal ashes, Dry covers, Unsaturated flow, Soil columns.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta resultados obtidos em modelos experimentais que simulam sistemas de coberturas secas para resíduos sólidos urbanos, compostos por diferentes configurações de camadas de solos, de cinzas e de misturas solo-cinzas do estado do Ceará. Os modelos foram dimensionados a partir de modelagem numérica do fluxo de água e balanço hídrico realizado anteriormente por SOUZA [5]. A pesquisa utilizou cinzas oriundas da queima do carvão mineral na Usina Termoeletrica Energia Pecém, localizada no município de São Gonçalo do Amarante/CE. O estudo teve como incentivo inicial o fomento realizado pela empresa ENEVA, possibilitando o desenvolvimento de linhas de pesquisa pela Universidade Federal do Ceará para aproveitamento das cinzas de carvão mineral, a fim de desenvolver estudos que propusessem diferentes aplicações, no âmbito da Engenharia Civil, para o resíduo produzido e acumulado na usina termoeletrica.

O acúmulo de volumes consideráveis das cinzas de carvão mineral nos pátios anexos da usina termoeletrica do Pecém resultou na necessidade de buscar alternativas de aplicação em obras de engenharia capazes de absorver quantidades significativas deste material, garantindo a sustentabilidade do meio de destino. A aplicação das cinzas como material geotécnico em sistemas de coberturas secas apresentou-se como uma alternativa, uma vez que já haviam estudos relacionados a este tema [1, 2, 3, 4]

Os materiais utilizados nos modelos de coberturas foram: (a) cinzas coletadas em bacias de armazenamento localizadas na empresa Energia Pecém, em seu estado puro; (b) um solo da região metropolitana de Fortaleza e (c) misturas de solo e cinzas com diferentes composições (Tabela 1). Para o dimensionamento das coberturas utilizadas no modelo experimental foi realizada uma modelagem numérica unidimensional anterior [5], utilizando-se o software Vadose 2007 [6], na qual foram consideradas as condições climáticas e o solo de cobertura do Aterro Sanitário do Município de Caucaia/CE. Para todos os materiais (cinzas, solo e misturas) foram realizados ensaios em laboratório e campo para obtenção das propriedades geotécnicas necessárias para o estudo [5,7].

Tabela 1: Composição dos materiais considerados no desenvolvimento dos modelos numéricos [5].

MATERIAL*	CINZA COMPOSTA	SOLO NATURAL
CC	100%	0%
MS30C70	70%	30%
MS50C50	50%	50%
MS70C30	30%	70%
SN	0%	100%

* CC – Cinza Composta; SN – Solo Natural; M – Mistura; S – Solo; C – Cinza.

Dos cinco modelos numéricos desenvolvidos, quatro possuíam um sistema de cobertura com duas camadas, sendo uma camada superior de solo natural (30 cm) para proteção e uma camada com função impermeabilizante (30 cm) composta por cinza composta ou uma das quatro misturas de cinzas e solo. O último modelo considerou uma camada única de solo natural (30 cm), representando o sistema de cobertura aplicado aterro sanitário estudado. Além disso, incorporou-se, a cada um dos modelos, uma camada de 1,0 m de resíduos sólidos abaixo do sistema de cobertura. Toda a execução da modelagem numérica, assim como seus resultados podem ser encontrados de forma detalhada em SOUZA [5].

A definição dos sistemas de cobertura a serem reproduzidos em colunas de solo se baseou nos resultados de balanço hídrico e dos perfis de saturação obtidos na modelagem numérica. O material que apresentou o melhor desempenho foi a mistura MS70C30, como menor volume de água percolado e manutenção as condições de saturação em condições de estresse hídrico.

Partindo-se dos resultados obtidos nas modelagens numéricas, o desenvolvimento das colunas de solo experimentais teve como objetivo a realização de ensaios de infiltração que possibilitassem verificar as condições de fluxo não-saturado no interior dos sistemas de coberturas dos modelos experimentais. As condições de saturação dos materiais e o volume de água percolado nos ensaios experimentais foram considerados para avaliar a viabilidade da aplicação das cinzas de carvão mineral em sistemas de coberturas secas de depósitos de resíduos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A seleção dos modelos de coberturas a serem executados na forma de colunas de solos baseou-se nos resultados obtidos na modelagem numérica descrita em SOUZA [5]. À partir dos resultados das simulações de cinco modelos numéricos, definiu-se três colunas de solo a serem executadas experimentalmente: (a) Coluna A: modelo que utilizou a uma camada contendo a mistura de solo-cinzas de melhor desempenho nas modelagens numéricas, como camada impermeabilizante, subjacente a uma camada de proteção (b) Coluna B: modelo que considerou com a cinza em seu estado puro, subjacente a uma camada de proteção e o (c) Coluna C: modelo onde se considerou a cobertura existente no aterro sanitário estudado, composta por uma camada única de solo.

Os parâmetros analisados para escolha dos modelos foram os perfis de saturação e os volumes percolados obtidos nos modelos numéricos. A coluna de solo que considerou a mistura com melhor desempenho (Coluna A) foi instrumentada com sensores de umidade, permitindo o acompanhamento das condições de saturação dos materiais, além da coleta dos volumes percolados. Nas outras duas colunas, verificou-se apenas o volume percolado no sistema.

A tabela 2 demonstra o resultado final do balanço hídrico para as cinco situações analisadas na modelagem numérica, considerando-se o ano de 2009, o mais chuvoso na série histórica analisada. A figura 1 apresenta os perfis de saturação para o material com melhor desempenho, referentes aos trimestres com maior volume de chuvas (Abril à Junho) e o de maior estresse hídrico (Outubro à Dezembro) para o ano considerado no estudo (2009). Para cada mês, foram selecionados os sete dias que apresentaram o maior volume de precipitação, a fim de permitir melhor visualização das variações dos perfis de saturação ao longo do período considerado.

Tabela 2: Resumo dos resultados de balanço hídrico [5].

Material Principal	CC	MS30C70	MS50C50	MS70C30	SN
Precipitação (m ³)	0,628	0,628	0,628	0,628	0,628
Runoff (m ³)	0,093	0,093	0,138	0,306	0,017
Evaporação (m ³)	-0,286	-0,312	-0,273	-0,294	-0,314
Armazenamento (m ³)	-0,064	-0,068	-0,056	-0,068	-0,067
Percolação	-0,319	-0,298	-0,268	-0,101	-0,373
Erro	-0,007	-0,006	-0,0005	-0,007	-0,008
Redução do volume percolado em relação ao modelo com solo natural	0,054 (14,5%)	0,075 (20,11%)	0,105 (28,15)	0,272 (73%)	-

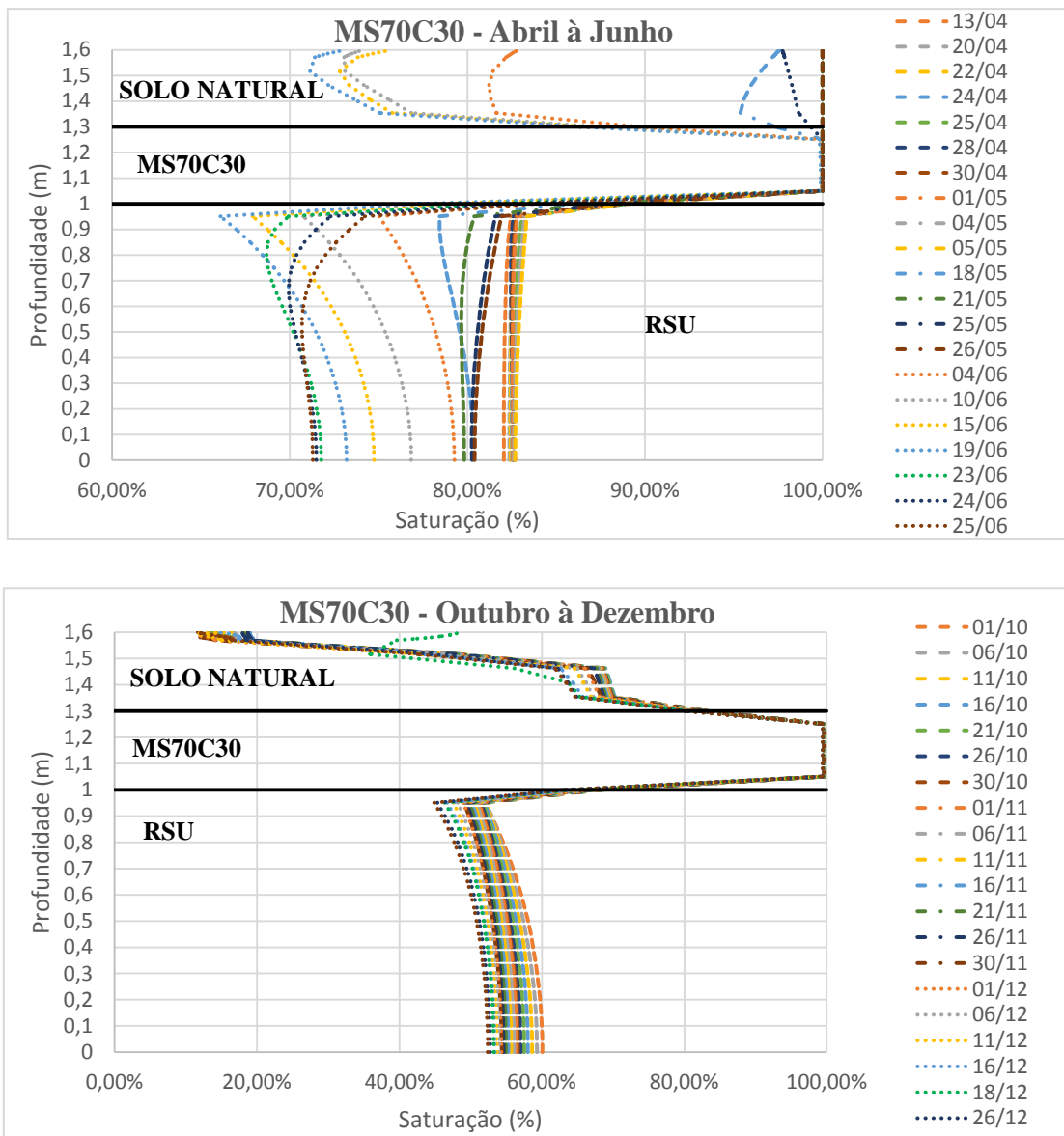


Figura 1: Perfis de saturação para a mistura de cinzas e solo com o melhor desempenho.

2.1 Materiais considerados

Para a execução dos modelos experimentais, considerou-se três materiais como camadas de cobertura: mistura de solo e cinzas (MS70C30), cinza composta (CC) e solo natural (SN). Além de ser considerado como material impermeabilizante no modelo que representou a cobertura existente no aterro sanitário, o solo natural também foi utilizado na forma de uma camada de proteção e desenvolvimento de vegetação sobre a camada impermeabilizante nos outros dois modelos. A descrição detalhada e caracterização geotécnica de todos os materiais utilizados podem ser vistas em SOUZA [5] e ELIAS [7]. A composição de cada um dos materiais pode ser vista na tabela 3.

Tabela 3: Composição dos materiais utilizados.

MATERIAL	CINZA COMPOSTA	SOLO NATURAL
CC	100%	0%
MS70C30	30%	70%
SN	0%	100%

2.2 Geometria dos modelos experimentais

Os modelos experimentais são compostos por colunas acrílicas que permitiram simular o fluxo unidimensional através das coberturas, quando sujeitas a uma taxa de infiltração na superfície. Os três modelos executados são apresentados na Figura 2, sendo definidos como:

- a) Modelo A – Uma camada superior com espessura de 30 cm de solo natural e uma camada principal de MS70C30 também com 30 cm de espessura. O mesmo modelo foi instrumentado com três sensores de umidade;
- b) Modelo B – Uma camada superior com espessura de 30 cm de solo natural e uma camada principal de cinza composta também com 30 cm de espessura;
- c) Modelo C – Uma camada única de 30 cm de espessura de solo natural representando a cobertura verificada no Aterro Sanitário do Município de Caucaia.

A espessura das camadas foi definida com base nas recomendações de BOSCOV [8] e O’KANE *et al.* [9], que indicam uma espessura mínima de 30,0 cm para uma camada impermeabilizante de cobertura. Além disso, como apresentado pelos mesmos autores, desde a execução da modelagem numérica, considerou-se como ideal um coeficiente de permeabilidade igual ou inferior a $1,0 \times 10^{-9}$ m/s para os materiais utilizados nessa camada.

Para camada de proteção e cultivo (solo natural) adotada para os dois primeiros modelos, adotou-se o mesmo peso específico e umidade, que foram obtidos *in situ* para a cobertura do aterro sanitário, com coleta de amostra para determinação da umidade e ensaios de frasco de areia (Ensaio realizado por BARBOSA [10]), de acordo com a NBR 7185 [11]). Na parte inferior das colunas de solo, abaixo do sistema de cobertura, foi executado um dreno de areia, a fim de permitir o fluxo livre de água.

2.3 Execução das colunas de solo

Os sistemas de coberturas escolhidos foram executados em tubos de acrílico com diâmetro interno de 29,0 cm, espessura de 0,5 cm e 100,0 cm de comprimento. As camadas principais dos modelos A e B foram compactados segundo a energia Proctor Normal, utilizando um soquete adaptado e considerando os pesos específicos máximos e umidades ótimas obtidos por ELIAS [7] para os materiais, como visto na tabela 4.

Tabela 4: Dados de considerados para a compactação [7].

Material	k_{sat} (m/s)	γ_d (g/cm ³)	G_s	e	n
CC	1.58×10^{-7}	1.102	2.44	1.214	0.548
MS70C30	4.26×10^{-9}	1.679	2.46	0.465	0.317
MS50C50	5.69×10^{-8}	1.457	2.45	0.681	0.405
MS30C70	8.03×10^{-8}	1.285	2.39	0.860	0.462
SN	6.70×10^{-7}	1.600	2.62	0.638	0.384

*Os dados referentes à SN foram obtidos em SOUZA [5].

As camadas de solo natural foram depositadas, sem compactação controlada, de modo a manter o peso específico e umidade encontrados no aterro sanitário. Neste caso, calculou-se a massa necessária para ocupar o volume correspondente à camada, dividindo-a em seis camadas intermediárias de alturas iguais (5 cm/camada), que foram conformadas individualmente com o uso de um regularizador de superfície até que fosse atingida a altura total.

Abaixo das camadas de cobertura, foi conformada uma camada de areia (dreno), isolada acima (material da cobertura) e abaixo (fundo do sistema) por uma geotêxtil de baixa gramatura, a fim de evitar a fuga de material fino. Por fim, uma tampa de PVC foi encaixada no fundo do tubo de acrílico associado a uma válvula de lavatório para coleta do percolado. O contato entre o tubo de acrílico com o fundo de PVC foi devidamente vedado com silicone (para inibir vazamentos) e todo o sistema foi apoiado sobre um caixote de madeira. A figura 2 demonstra a configuração final das colunas de solo após sua montagem, de acordo com a geometria inicialmente proposta.

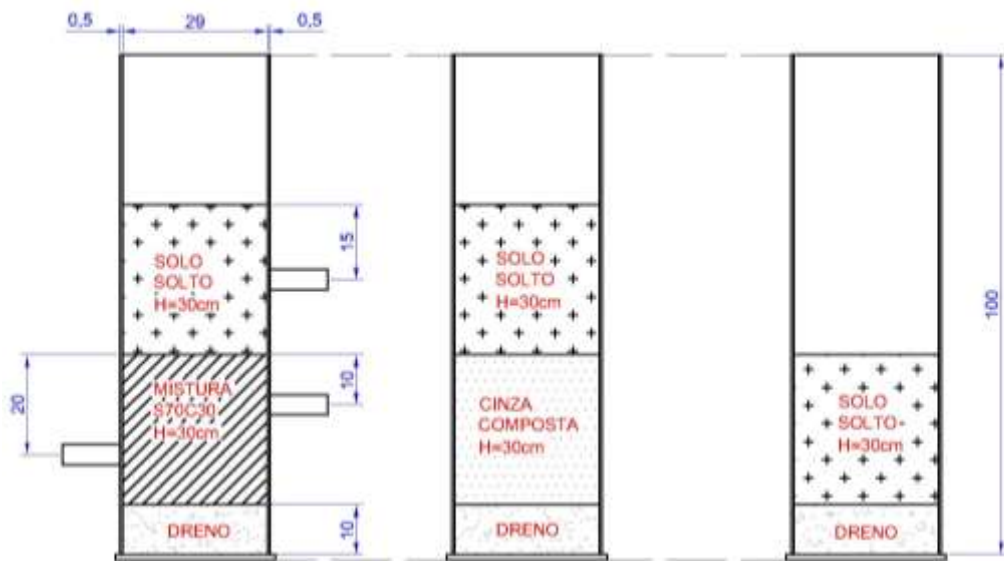


Figura 2: Colunas de solo montadas.

2.4 Sensores de umidade

Ao modelo principal, onde foi considerada a mistura com melhor desempenho com material impermeabilizante, foram associados três sensores de umidade do tipo TDR (Figura 3). Um dos sensores foi instalado na parte central da camada de solo natural, enquanto os outros dois foram colocados à 10 e 20 cm em relação a face inferior da camada de barreira impermeabilizante. Através das medidas realizadas pelos sensores, foi possível acompanhar as condições de saturação dos materiais durante os ensaios de infiltração.

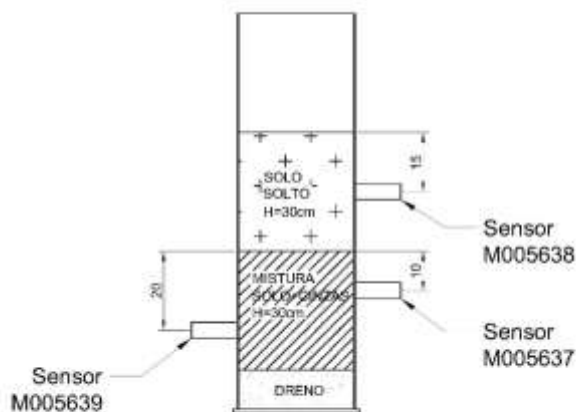


Figura 3: Posicionamento dos sensores.

Os sensores adquiridos pelo Projeto ENEVA são do tipo ThetaProbe ML-3 da Delta-T Devices, com precisão de 0,1% e acurácia de $\pm 1\%$. Os instrumentos são compostos por um corpo cilíndrico com 40,00 mm de diâmetro e comprimento total de 242,5 mm, compostos por uma base com conexão para o leitor e quatro hastes metálicas de 60 mm de comprimento cada. Para realização das medidas de umidade, utilizou-se um leitor digital, modelo HH-2, também da DELTA-T DEVICES [12].

Para que as leituras fossem realizadas de forma precisa, foi executada uma calibração prévia dos sensores segundo procedimento descrito no manual do fabricante. O processo de obtenção das curvas de calibração dos sensores está descrito em SOUZA [5].

2.5 Ensaios de infiltração e coleta dos resultados

As condições de fluxo nos modelos experimentais foram verificadas através da coleta dos volumes de água percolados, gerados a partir dos ensaios de infiltração, onde foram aplicados determinados volumes de água sobre a superfície dos modelos. No modelo instrumentado com os sensores de umidade (Modelo A), também foram obtidos os perfis de saturação ao longo do procedimento.

Os volumes de água aplicados nos modelos experimentais, que serviram para simular volumes infiltrados nas coberturas, tomaram como referência os resultados de balanço hídrico obtidos nas modelagens numéricas do ano de 2009 [5], que foi o ano mais chuvoso no período de 20 anos, considerada a série histórica fornecida pela estação experimental Posto Caucaia (monitorada pela FUNCEME e localizada à 4.7 km do aterro sanitário), usado nas simulações. As modelagens numéricas geraram parcelas mensais e anuais de precipitação, de escoamento superficial, de evaporação, de armazenamento e de percolação.

Os dados da modelagem numérica permitiram obter para cada mês o volume de água infiltrada, através da redução das parcelas de escoamento superficial e evaporação do volume precipitado mensal ($\text{Infiltrado} = \text{Precipitado} - \text{Escoamento superficial} - \text{Evaporação}$). Os ensaios nos modelos experimentais serviram para verificar o desempenho das diferentes coberturas secas em períodos mais chuvosos da região metropolitana de Fortaleza. O objetivo do experimento foi verificar variações extremas nos valores de saturação dos materiais e o volume de água percolado no sistema.

Os volumes mensais infiltrados foram diferentes em cada modelo numérico, pois estes são influenciados pelas diferentes configurações de camadas e podem ser resultado de precipitações acumuladas (e outras parcelas do balanço hídrico). Para a definição do volume a ser infiltrado em cada modelo experimental, tomou-se como referência os resultados da modelagem numérica para o mês de abril de 2009, período que apresentou a maior volume de infiltração, convertendo-se os volumes infiltrados no modelo numérico para os volumes infiltrados no modelo experimental, uma vez que as áreas de seção transversal foram distintas nos dois modelos.

Os ensaios foram realizados em duplicata, por um período de um mês cada, com um intervalo de 15 dias entre os ensaios. O volume total de infiltração de cada ensaio foi dividido em parcelas de volumes iguais, sendo que a parcela seguinte era aplicada após a total infiltração da parcela anterior no solo da cobertura. O volume de água infiltrado foi aplicado por um reservatório perfurado na extremidade inferior que foi posicionada sobre a abertura superior do modelo experimental à uma altura de 40,0 cm (Figura 4). A coluna de água (carga hidráulica) sobre a superfície manteve-se variável, pois dependia das condições de infiltração dos materiais no momento da aplicação da parcela.



Figura 4: Aplicação dos volumes de infiltração.

Os volumes percolados foram medidos com o uso de uma proveta graduada, após seu acúmulo e término da percolação em um reservatório localizado abaixo do dreno inferior. As medidas de umidade foram feitas com o uso do leitor digital conectado aos sensores, procedimento realizado a cada dois dias, mesmo durante o período de intervalo entre os dois ensaios.

3. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes ao desempenho dos modelos em relação ao fluxo no interior dos materiais e as condições de saturação dos materiais no Modelo A. São demonstrados os perfis de saturação para os dois ensaios realizados e os volumes percolados em relação ao precipitado.

3.1 Volume percolado

Na tabela 4 são apresentados os resultados referentes aos volumes de água percolados durante o primeiro ensaio de infiltração. Os volumes infiltrados aplicados na superfície dos modelos experimentais diferem nos três modelos porque as parcelas do balanço hídrico são diferentes para diferentes configurações de cobertura, como se observou nos resultados obtidos na modelagem numérica [5]. A fim de verificar o desempenho da cobertura, no que se refere à diminuição do volume percolado, calculou-se uma precipitação equivalente ao volume infiltrado aplicado, que permitiu estabelecer uma relação entre o volume percolado e o volume precipitado equivalente, dado pela equação 1.

$$V_{\text{precipitado eq}} = (V_{\text{infiltrado real}} \times V_{\text{precipitado mensal}}) / V_{\text{infiltrado mensal}} \quad (1)$$

Onde:

- $V_{\text{precipitado eq}}$ – Volume precipitado equivalente (no ensaio);
- $V_{\text{precipitado mensal}}$ – Volume precipitado no mês de referência (abril 2009);
- $V_{\text{infiltrado real}}$ – Volume de água infiltrado equivalente (no ensaio);
- $V_{\text{infiltrado mensal}}$ – Volume infiltrado no mês de referência (abril 2009).

Tabela 5: Resultados do primeiro ensaio de infiltração.

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Precipitado Equivalente (l).	44,68	12,36	13,87
Infiltrado (l)	6,50	7,30	10,80
Percolado (l)	1,38	5,42	6,90
Percentual no modelo experimental (%)*	3,09	43,85	49,75

*Percolação em relação ao precipitado

Na tabela 6 são demonstrados os resultados para o segundo ensaio de infiltração. As considerações adotadas para esse ensaio foram as mesmas que as do primeiro ensaio.

Tabela 6: Resultados do segundo ensaio de infiltração.

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Precipitado Equivalente (l)	13,13	24,39	9,68
Infiltrado (l)	1,91	14,40	7,54
Percolado (l)	1,45	15,96	5,08
Percentual no modelo experimental (%)*	11,04	65,43	52,48

*Percolação em relação ao precipitado

3.3 Perfis de saturação

Os perfis de saturação somente foram obtidos para o Modelo A, que foi o modelo experimental instrumenta-

do com sensores de umidade. A partir das leituras dos sensores foi possível obter perfis de umidade e saturação ao longo da profundidade para os dois ensaios (Figuras 5 e 6). Os dados para cada ensaio foram divididos em dois gráficos cada para se obter melhor visualização dos perfis de saturação ao longo do tempo.

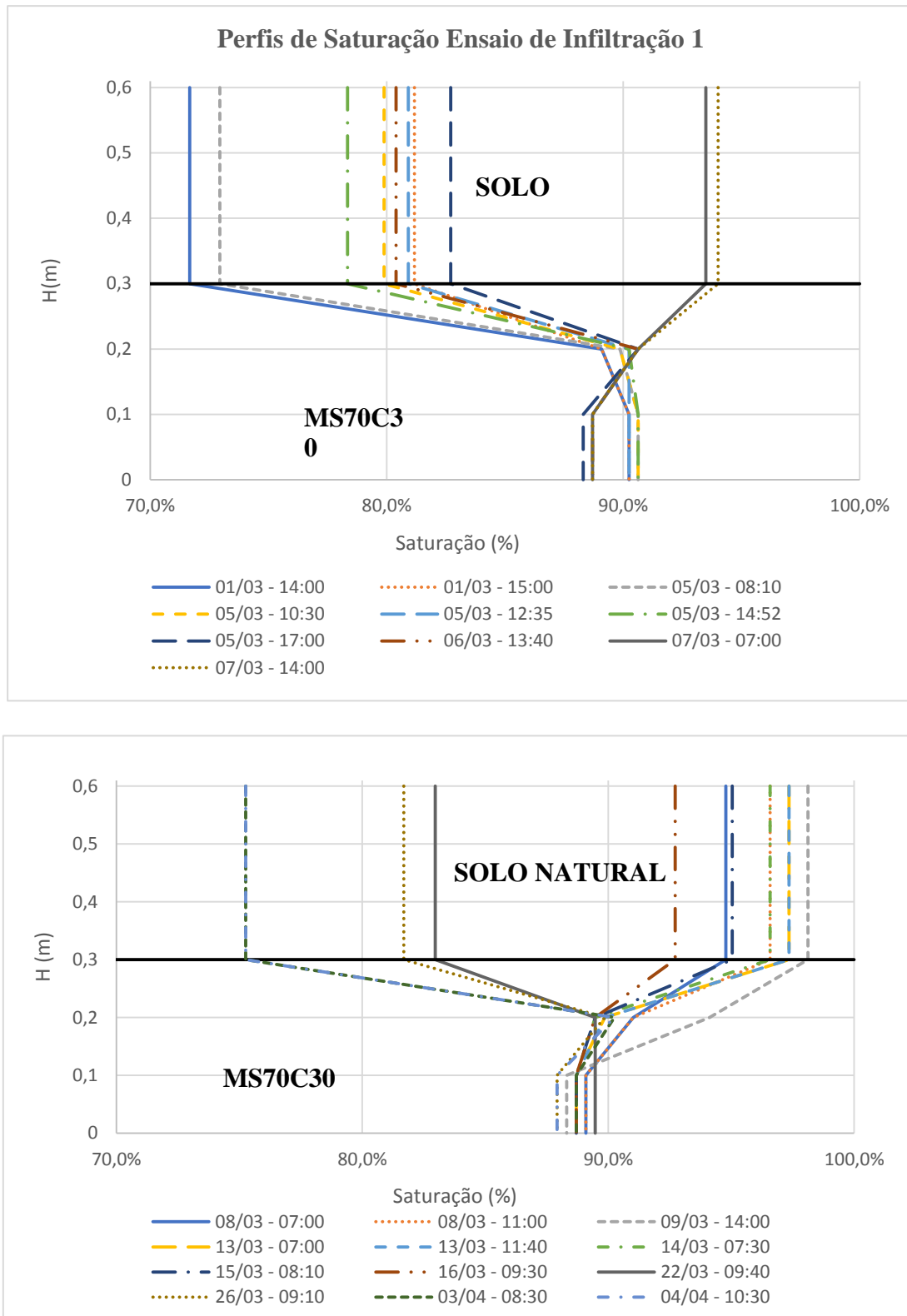


Figura 5: Perfis de saturação para o primeiro ensaio de infiltração (Modelo A).

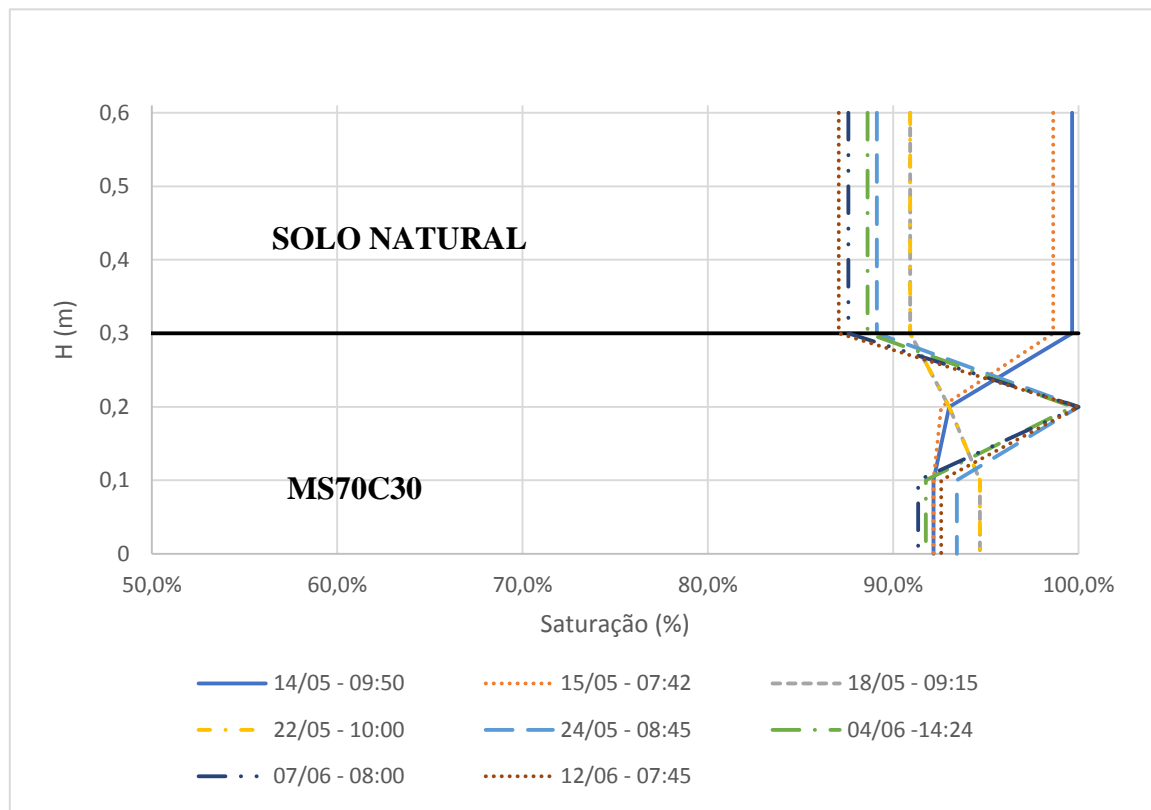
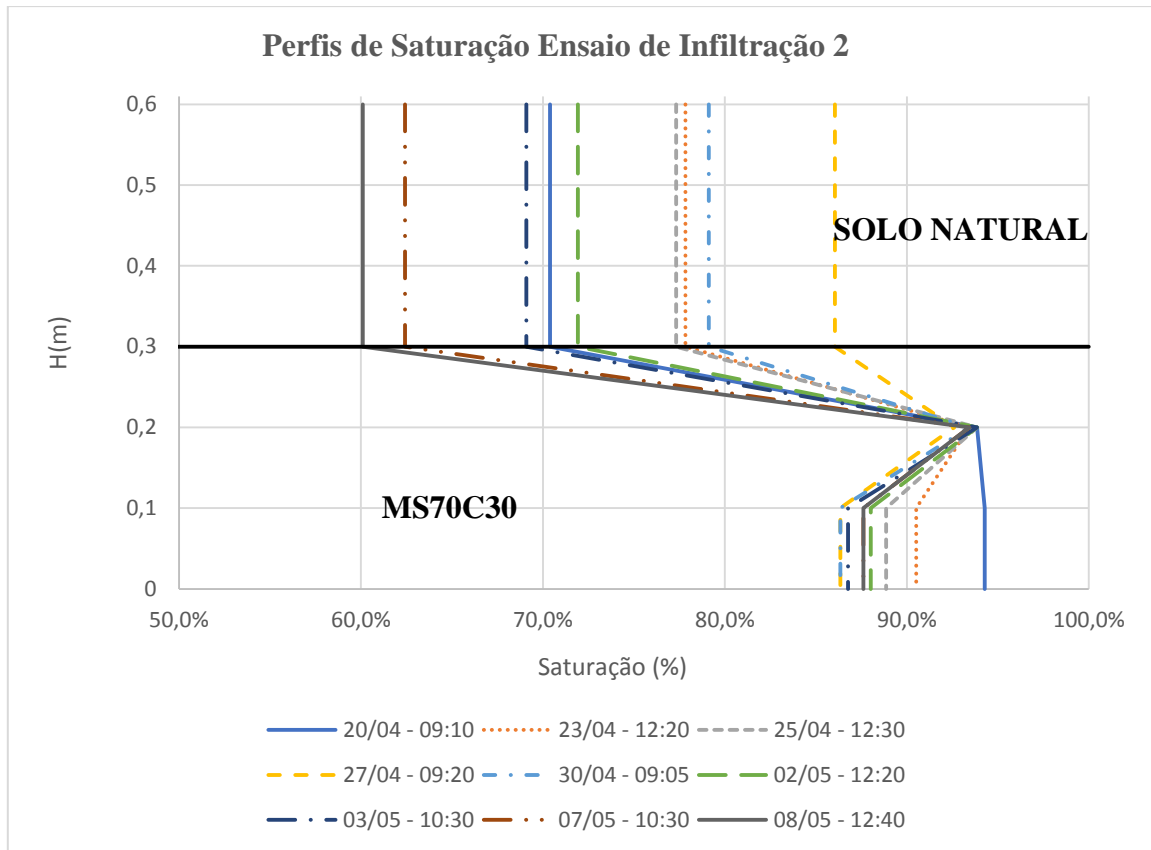


Figura 6: Perfis de saturação para o segundo ensaio de infiltração (Modelo A).

4. DISCUSSÃO

No primeiro ensaio de infiltração realizado (Tabela 5), pode-se observar que, o modelo que apresentou o melhor desempenho em relação a percolação foi o que adotou a mistura de solo e cinzas (MS70C30). O modelo apresentou o menor volume percolado em relação ao precipitado (3,09%), muito inferior ao obtido nos outros dois modelos (Modelo B: 43,85% e o Modelo C: 49,75%). Estes resultados são concordantes com os obtidos na modelagem numérica realizada por SOUZA [5].

No segundo ensaio, verificou-se que o percentual percolado aumentou em relação ao primeiro. Este aumento do percentual do percolado pode estar associado às condições de saturação iniciais dos materiais antes do ensaio, que apresentou uma saturação maior no segundo ensaio. O segundo ensaio (duplicata) foi realizado 15 dias após o término do primeiro, iniciando com a mesma saturação correspondente ao final do primeiro ensaio (a umidade não variou ao longo dos 15 dias, de acordo com as medidas dos sensores). O Modelo A atingiu um percentual de 11,04%, pouco superior ao obtido no primeiro procedimento, mas ainda assim bem inferior aos outros dois modelos. Os modelos B e C alcançaram valores de 65,43% e 52,48%, demonstrando o desempenho muito inferior desses sistemas em relação ao primeiro.

Analisando-se isoladamente o Modelo C, que replica o sistema de cobertura encontrado no Aterro Sanitário de Caucaia, verifica-se a similaridade com a situação observada por VIDAL e BORMA [13]. No estudo em questão também se verificou o baixo desempenho do sistema de cobertura de outro aterro sanitário brasileiro, onde se observa a ineficiência em reduzir significativamente a percolação no interior do elemento.

Quanto aos modelos A e B, que consideram materiais alternativos (resíduos), ALBRIGHT *et al.* [14], ao analisar as coberturas de diferentes aterros sanitários em distintas condições climáticas, verificou que aplicações de materiais alternativos em coberturas expostas ao clima semiúmido, como o caso do município de Caucaia, são, usualmente, eficazes em manter baixos valores de infiltração. Entretanto, a situação considerada aceitável pelo autor é um valor de 0.4% de percolação em relação ao precipitado, muito inferior ao valor obtido para os dois modelos estudados. Contudo, essas considerações são feitas em relação às normas de outro país (Estados Unidos), além de avaliar sistemas de coberturas mais complexos que os adotados neste trabalho. Desse modo, torna-se necessário avaliar a eficiência modelos de cobertura *in situ*, através da execução de um elemento piloto instrumentado e exposto às condições climáticas do aterro sanitário estudado, a fim de tornar mais realista a análise da possibilidade de aplicação das cinzas de carvão mineral.

Em relação aos perfis de saturação, obtidos apenas para o Modelo A, pode-se verificar que, no primeiro ensaio, a camada de material impermeabilizante não atingiu a saturação total, mantendo valores próximos a 94,0% de saturação. Ao longo da realização desse ensaio, verificou-se, de fato, uma reduzida taxa de infiltração após a saturação da camada de solo natural. Essa situação resultou na formação de uma coluna de água sobre a superfície do material a partir da aplicação da segunda parcela do volume de água definido, indicando o fluxo reduzido no interior do material.

O solo natural, por ter maior tendência à perda de umidade, apresentou maior variação nos valores de saturação. A maior porosidade desse material, por ser considerado como um solo para proteção/cultivo, além do fato de possuir sua face superior exposta às condições ambientes, resultou em uma maior variação na umidade e, conseqüentemente, em seu grau de saturação.

No segundo ensaio, a mistura de solo-cinzas (MS70C30) atingiu a total saturação na região superior da camada, entretanto, na porção inferior, os valores de saturação variam no intervalo de 88,0 a 95,0%. Também se verificou, como no primeiro ensaio, a formação de uma coluna de água sobre a cobertura, devido à baixa permeabilidade condicionada pela camada impermeabilizante. A situação demonstra que o material manteve o fluxo não-saturado nos dois ensaios, não atingindo a total saturação em toda a camada. A diferença de saturação ao longo da camada pode ter ocorrido devido à presença de ar ocluso nos vazios.

Ao se observar a figura 5, verifica-se uma variação significativa de saturação na porção superior da camada de mistura. O comportamento, observado entre as datas 24/05 e 04/06, deve-se fluxo resultante da coluna de água acumulada após todas as aplicações de água, o que levou à saturação dessa região do material. Apesar disso, como verificado na mesma figura, o tempo total de ensaio não foi suficiente para se atingir a total saturação da camada impermeabilizante.

Para situações em que o sistema de cobertura tenha como função, também, inibir ou reduzir a entrada de oxigênio ou saída de biogás resultante da decomposição do material isolado (caso dos aterros sanitários), O'KANE *et al.* [9] descreve a necessidade de se manter uma elevada condição de saturação dos materiais componentes do sistema, com o objetivo de conter o fluxo desses gases. Não obstante, observou-se que a mistura MS70C30 foi capaz de manter condições de saturação elevadas, permitindo o condicionamento do fluxo de gases no interior da cobertura. A mesma situação pôde ser observada em COSTA *et al.* [15], onde a aplicação de uma material alternativo (mistura de solo e produto compostado) em simulações de coberturas

de aterros sanitários em colunas de solo permitiu a manutenção de condições de saturação elevadas, o que permitiu a redução da percolação de água e emissão de metano (CH_4) pelo sistema.

5. CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos para o modelo experimental, que simulou a infiltração em coberturas secas para aterros sanitários, observou-se que o Modelo A, com uma camada de 30 cm da mistura MS70C30 (menor proporção de cinzas) como material impermeabilizante da cobertura, apresentou potencial para aplicação em sistemas de coberturas secas em depósitos de resíduos. Apesar de não atingir a total saturação, a mistura de solo cinza utilizada como material impermeabilizante mantém condições elevadas de saturação, suficientes para garantir redução do fluxo de gases no interior do sistema, além de ter apresentado reduzida taxa de percolação (3,09% para o primeiro ensaio e 11,04% para o segundo) em relação às outras colunas de solo testadas.

Os outros dois modelos apresentaram volumes percolados muito elevados, atingindo percentuais de percolado em relação ao volume precipitado superiores a 50,0%. Estes quando comparados a coluna contendo uma camada de mistura solo-cinzas (MS70C30) (modelo A), apresentaram desempenhos muito inferiores, não havendo reduções significativas do volume percolado. Não obstante, a cinza em seu estado puro possui uma difícil trabalhabilidade, além de um elevado teor de umidade ótima, o que pode dificultar significativamente sua aplicação em campo. Por este motivo a utilização de mistura de cinzas com solo, como material impermeabilizante de cobertura, é recomendável, não sendo viável o uso de somente de cinzas na camada.

Como citado anteriormente, a capacidade da mistura de solo e cinzas de manter elevadas condições de saturação pode indicar a possibilidade de sua aplicação como barreira ao fluxo de gases em diferentes situações. Entretanto, é necessário um estudo aprofundado que leve em consideração as variáveis associadas, partindo-se, possivelmente, da mesma metodologia adotada neste trabalho.

Apesar de não ter sido possível aplicar as condições ambientais *in situ* sobre as colunas de solo, dentro do período de um ano, o experimento permitiu obter um indicativo claro do potencial de aplicação dos sistemas de cobertura dimensionados, utilizando um resíduo que, em condições usuais de deposição, pode ocasionar significativo impacto ambiental. A realização de um estudo em escala piloto no local de execução do aterro sanitário, considerando toda a instrumentalização necessária, permitirá obter dados mais precisos e realistas quanto a viabilidade de sua implantação.

Por fim, a aplicação da mistura MS70C30 como material impermeabilizante de cobertura possibilitaria o consumo significativo do volume de cinzas acumulado nas bacias de armazenamento da usina termoeletrica, devido ao grande porte do elemento de cobertura e a atividade continua do aterro sanitário. Além disso, a proximidade entre os locais, sendo ambos conectados por uma rodovia, torna viável o transporte das cinzas, necessitando-se apenas o estudo das condições para esse deslocamento e o armazenamento, enquanto o solo natural, o mesmo utilizado no estudo, é proveniente do processo de escavação e terraplanagem do próprio aterro sanitário, o que elimina a necessidade de jazidas de solo externas.

6. AGRADECIMENTOS

Projeto ENEVA, Universidade Federal do Ceará, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Laboratório de Mecânica dos Solo e Pavimentação e Equipe Técnica do Aterro Sanitário do Município de Caucaia.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] SOARES, A. B., *et al.*, “Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. I: Materials Characterization and Numerical Modeling”, *Mine Water And The Environment*, [s.l.], v. 28, n. 3, pp.219-231, 18 jun. 2009.
- [2] SOARES, A. B., *et al.*, “Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil, Part II: Pilot Unit Construction and Initial Monitoring”. *Mine Water And The Environment*, [s.l.], v. 29, n. 4, pp.277-284, 29 set. 2010.
- [3] UBALDO, M. O. “Uso de cinzas de carvão na composição de uma cobertura de rejeitos de mineração”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [4] MENDOÇA, R. M. G. “Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura”, Tese de D.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

- [5] SOUZA, H. P., “Uso de cinzas de carvão mineral da usina termelétrica do Pecém como material de cobertura seca de depósitos de resíduos”, Dissertação de M.Sc. DEHA/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2018.
- [6] GEO-SLOPE. *Vadose Zone Modeling with Vadose/W 2007: An Engineering Methodology*. GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, Alberta, Canada, 2008.
- [7] ELIAS, D.S., “Caracterização de cinzas de carvão mineral e sua aplicação como barreira impermeabilizante”, Dissertação de M.Sc., DEHA/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2018.
- [8] BOSCOV GIMENEZ, M. E. *Geotecnia Ambiental*. São Paulo, Oficina de Textos, 2008.
- [9] O’KANE, M., AYRES, B., CHRISTENSEN, D., *et al.*, *Manual on Cover System Design for Reactive Mine Waste*. In: *CANMET-CETEM*, Report No. 689-01 O’Kane Consultants Inc, 2002.
- [10] BARBOSA, A. Á. R. “Caracterização geotécnica da cobertura do aterro sanitário de Caucaia e análise dos recalques utilizando o Modelo Hiperbólico de Ling”, TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, DEHA/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2016.
- [11] ANÔNIMO (2016), NBR-7185: *Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia*. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [12] DELTA-T DEVICES LTD. *User Manual for the ML3 ThetaProbe*. Cambridge: Delta-t Devices Ltd, 2017.
- [13] VIDAL, F. S., BORMA, L. S., “Avaliação do Perfil de Saturação de uma Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos Utilizando o Modelo SoilCover”, In: *Anais do Congresso II Geojovem*, pp. 1-4, Nova Friburgo, 2006.
- [14] ALBRIGHT, W. H., BENSON, C.H., GEE, G.W., *et al.*, “Field Water Balance of Landfill Final Covers”, *Journal of environmental quality*, pp. 2317-2332, Dec. 2004.
- [15] COSTA, M. D., MARIANO, M. O. H., ARAUJO, L. B., *et al.*, “Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações”, *Eng. Sanit. Ambient.* [online], v.23, n.1, pp.77-90, 2018.

ORCID

Henrique Petisco de Souza <https://orcid.org/0000-0002-1625-2531>
Anderson Borghetti Soares <https://orcid.org/0000-0003-0708-3702>
Deyvid de Souza Elias <https://orcid.org/0000-0002-2239-4843>